白腐菌对玉米秸秆营养价值及抗氧化性能的影响[1]

王雨琼[1,2]　周道玮[1*]

（1.中国科学院东北地理与农业生态研究所，长春　130000；2.中国科学院大学，北京　100049）

摘　要：本试验旨在研究白腐菌对玉米秸秆营养价值及抗氧化性能的影响。选取 4 种侧耳属白腐菌，分别为红侧耳（*Pleurotus diamor*）、金顶侧耳（*Pleurotus citrinopileatus*）、刺芹侧耳（*Pleurotus eryngii*）和漏斗状侧耳（*Pleurotus sajor caju*）。对照组玉米秸秆不接种菌株，试验组玉米秸秆分别接种 4 种侧耳属白腐菌，每个组设置 3 个重复，固态发酵 20 d，测定发酵物的营养成分含量和体外干物质消化率（IVDMD），并评估其抗氧化性能。结果显示：1）红侧耳组总有机物（TOM）损失率显著高于金顶侧耳组和刺芹侧耳组（$P<0.05$），漏斗状侧耳组酸性洗涤纤维（ADL）损失率显著高于其他各组（$P<0.05$），金顶侧耳组纤维素（CL）损失率显著高于刺芹侧耳组和漏斗状侧耳组（$P<0.05$），金顶侧耳组半纤维素（HC）损失率显著高于其他各组（$P<0.05$）。2）金顶侧耳组的粗蛋白质（CP）含量显著高于对照组（$P<0.05$），金顶侧耳组、漏斗状侧耳组和红侧耳组的粗脂肪（EE）含量显著高于对照组（$P<0.05$），4 种白腐菌组的总氨基酸含量显著高于对照组（$P<0.05$），4 种白腐菌组的 IVDMD 显著高于对照组（$P<0.05$）。3）4 种白腐菌组的 1,1-二苯基 2-三硝基苯肼(DPPH)自由基清除力、还原力、总抗氧化能力和总酚含量均显著高于对照组（$P<0.05$）。由此可见，白腐菌预处理的玉米秸秆能提高其 IVDMD、CP 含量及抗氧化性能，可以作为反刍动物新型饲料资源。

关键词：白腐菌；玉米秸秆；抗氧化性能

中图分类号：S816.15　　　文献标识码：A　　　　　　　文章编号：

我国农作物秸秆资源丰富，占全世界秸秆总产量的 20%~30%。其中大部分被闲置和焚

收稿日期：2017-05-06

基金项目：国家重点研发计划项目（2016YFC0500606）

作者简介：王雨琼（1987-），女，吉林长春人，博士研究生，从事反刍动物营养研究。E-mail: wangyuqiong@iga.ac.cn

*通信作者：周道玮，研究员，博士生导师，E-mail: zhoudaowei@iga.ac.cn

烧，不仅污染环境，还造成了资源的浪费。秸秆的饲料化是秸秆利用的有效方式之一，然而由于秸秆中含较高纤维素（CL）、半纤维素（HC）和木质素等大分子聚合物，导致低营养和低消化率等问题，严重限制了秸秆饲料化的发展[1]。近年来，随着各种秸秆加工处理技术（物理法、化学法和生物法）的成熟，秸秆饲料的营养价值及其应用有了大幅度改善，其中，生物法处理有效解决了秸秆低消化率和低营养价值等不足之处[2]，并在改善秸秆营养价值、安全、绿色、无污染等优势方面成为研究热点。

真菌具有较强降解木质素等芳香族化合物的能力[3]，可通过自身分泌的胞外过氧化物酶有效地将秸秆中木质素、CL 等大分子聚合物质降解为单体、二聚体或低聚酚等化合物[4-5]。研究表明，多糖和多酚类化合物具有抗氧化和调节免疫力等生物活性。动物组织正常的生理代谢会不断地产生自由基（如超氧化物阴离子、过氧自由基、一氧化氮和过氧化氢），这些自由基能够破坏机体内蛋白质、脂肪、DNA 等重要的生物分子[6]。而抗氧化物质有助于稳定这些高活性的自由基，进而维持动物机体结构和功能的完整性。动物能够从饲粮营养物质中摄取抗氧化剂，抵御自由基对机体产生的氧化损伤，由此可见，营养性饲料中的抗氧化成分对动物的健康和免疫系统至关重要[7]。

关于优化生物处理秸秆的研究多集中在菌种筛选、产酶条件及降解机理等方面，目前，已经确定白腐菌降解木质 CL 效果最好，但对于其抗氧化能力的研究相对较少。因此，本试验选用 4 种侧耳属白腐菌：红侧耳（*Pleurotus diamor*）、金顶侧耳（*Pleurotus citrinopileatus*）、刺芹侧耳（*Pleurotus eryngii*）和漏斗状侧耳（*Pleurotus sajor caju*），通过发酵处理玉米秸秆，来探究其对玉米秸秆营养价值及抗氧化性能的影响，旨在为进一步研究更具功能性饲料的开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 菌种与主要试剂

试验选用 4 种常见的侧耳属白腐菌：红侧耳、金顶侧耳、刺芹侧耳和漏斗状侧耳，菌种

均购自江苏省天达食用菌研究所。

1,1-二苯基 2-三硝基苯肼(DPPH)（纯度 97%）、铁氰化钾（纯度 99.5%）、三氯乙酸（纯度 99%）、三氯化铁（纯度 99%）、三吡啶基三嗪（纯度 97%）、六水氯化铁、无水氯化亚铁、菲咯嗪（纯度 98%）、无水甲醇和无水乙醇均购自国药集团化学试剂有限公司，没食子酸（纯度 99%）和氨基酸标准品（纯度 99%）均购自美国 Sigma 公司。

1.2　菌种的活化

用接种环将白腐菌接种到高压灭菌的马铃薯琼脂固体培养基（马铃薯 200 g，一水葡萄糖 20 g，琼脂 20 g，蒸馏水 1 000 mL，pH 自然，121 ℃高压灭菌 20 min）上，置于 25 ℃恒温培养箱中培养 7 d。

1.3　液体菌种的制备

向 200 g 马铃薯中加入 1 000 mL 蒸馏水，煮沸 30 min，然后添加 20 g 一水葡萄糖，2 g 无水硫酸铵，1 g 蛋白胨，1 g 无水磷酸二氢钾，1 g 无水硫酸镁，自然 pH，制备成液体马铃薯培养基，分装在 250 mL 的三角瓶内，121 ℃高压灭菌 20 min 后，室温下冷却，取 8 块 8 mm 的食用菌菌块，放入到液体培养基中，25 ℃恒温避光培养 2 d 后，转入到 25 ℃、150 r/min 水浴摇床中放置 4 d。

1.4　试验设计和固态发酵

底料成分和比例：31.5%玉米秸秆（2~3 cm）、1.0%玉米面、1.0%尿素、0.5%石膏、0.5%维生素、0.5%矿物质元素、65.0%水，按照上述比例混匀，取 200 g 培养底料装入到耐高温的聚丙烯袋中，压实、封口。蒸汽高压处理 30 min，过夜，再次 121 ℃高压灭菌 30 min，室温下冷却后接种。对照组玉米秸秆不接种菌株，试验组玉米秸秆分别接种 4 种侧耳属白腐菌，每个组设置 3 个重复，接种量为底料干物质含量的 10%（质量分数），接种后放置在 25 ℃无光恒温培养箱内培养 20 d，在 40 ℃烘箱内烘干，置于-20 ℃保存待测。对照组同上培养条件及处理。

1.5 样品提取

准确称取 3 g 样品放入到磨口的三角瓶内，加入 10 mL 无水甲醇溶液，盖紧瓶盖并置于超声波仪内，超声处理 20 min，重复 2 次，过滤。采用旋转蒸发仪，40 ℃下蒸发过滤液至 5 mL，置于 4 ℃环境下，1 周内待用。

1.6 测定指标及方法

1.6.1 营养成分含量测定

CL 和 HC 含量测定采用范氏（Vansoest）纤维测定方法 [8]，酸性洗涤木质素（ADL）含量测定参照国标 GB/T 20805-2006 方法，粗蛋白质（CP）含量测定采用凯氏定氮法，粗脂肪（EE）含量采用索氏提取法[8]。

1.6.2 总氨基酸含量测定

称取 0.2~0.5 g 的样品置于 10 mL 盐酸（6 mol/L）中，110 ℃孵育 24 h，室温冷却后，采用 0.22 μm 过滤膜过滤水解液后，用 Agilent 1290 高效液相色谱仪（美国 Agilent 公司）进行测定。

测定条件：分析柱（4.6 mm×150 mm，3.5 μm）柱温 40 ℃，保护柱（4.6 mm×12.5 mm，5 μm），进样量为 2 μL，流速为 1.0 mL/min。流动相 A 为 40 mmol/L 磷酸氢二钠，pH 7.8，流动相 B 为 45%乙腈、45%甲醇和 10%的去离子水。

1.6.3 体外干物质消化率（IVDMD）测定

人工瘤胃营养液的配方参照 Menke 等[9]的方法。将 50 g（干重）绵羊粪便用研钵研碎与 1 L 的人工瘤胃营养液混合，此过程中使用磁力搅拌器持续搅拌，使粪便与人工瘤胃营养液温度保持在 39.5 ℃，持续通入 CO_2 以保持厌氧环境。用分液器向称有 0.3 g 样品的厌氧培养瓶内加入 30 mL 的人工瘤胃营养液，39.5 ℃培养 48 h 终止发酵，将样品烘干后，加入胃蛋白酶液消化 24 h，消化结束后，用 90 ℃蒸馏水冲洗，10 625×*g* 离心，倒掉上清，105 ℃烘干[10-11]，并计算 IVDMD。

1.6.4 DPPH 自由基清除力的测定

参考文献[12]的方法，将 DPPH 溶于无水乙醇溶液中，配制成 0.1 mmol/L DPPH 工作液。取 1 mL DPPH 工作液加入 0.5 mL 提取液混合均匀后，室温下静止 30 min，在 517 nm 处测定吸光度值（A_1），用同体积的无水乙醇溶液代替提取液测定空白吸光度值（A_0），用同体积无水乙醇溶液替代 DPPH 工作液测定对照组吸光度值（A_2），采用岛津分光光度计（UV-1800）测定吸光度值（以下试验同）。

DPPH 自由基清除力(%)=$[1-(A_1-A_2)/A_0]\times 100$。

1.6.5 还原力的测定

参照文献[13]的方法，取 0.5 mL 提取液加入 0.1 mL 1%的铁氰化钾，混合均匀后，50 ℃下静止 30 min，然后加入 50 μL 三氯乙酸和 50 μL、1%的三氯化铁，室温下静止 20 min 后于 700 nm 处测定吸光度值并计算还原力。

1.6.6 总抗氧化能力的测定

参照文献[14]的亚铁还原能力（FRAP）法，$FeSO_4$标准曲线的绘制：分别吸取 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 mmol/L 的 $FeSO_4$标准液（1.0 mmol/L），加入 2 mL FARP 反应液和 1 mL 蒸馏水，混匀后与 593 nm 处测定吸光度值。

FRAP 反应液是由 300 mmol/L 的乙酸（pH 3.6）、10 mmol/L 三吡啶基三嗪和 20 mmol/L 的氯化铁，按照体积 10:1:1 混合制成。取 2 mL 的 FARP 反应液，加入 0.5 mL 提取液和 1 mL 的蒸馏水，混合混匀后于 593 nm 处测定吸光度值并计算总抗氧化能力。

1.6.7 亚铁离子螯合能力测定

参照文献[15]的方法，将 0.5 mL 提取液与 1.6 mL 去离子水，0.5 mL 无水氯化亚铁和 0.1 mL、5 mmol/L 菲咯嗪混合均匀后，40 ℃下孵育 10 min，在 562 nm 处测定吸光度值（A_1），用同体积的无水甲醇溶液代替提取液测定空白吸光度值（A_0），用等体积去离子水溶液替代氯化亚铁工作液进行测定对照组吸光度值（A_2）。

亚铁离子螯合能力(%)=[1-(A_1-A_2)/A_0]×100。

1.6.8 总酚含量（total phenolic content,TPC）测定

以没食子酸作为标准品标绘制准曲线。加入 2 mL 的样品液，再加入 1 mL 福林试剂，振荡 3~4 min 后，加入 1 mL 20%的碳酸钠，30 ℃避光放置 30 min，置于 760 nm 测定吸光值并计算总酚含量。

1.7 数据统计分析

以上样品测定指标均重复 3 次，采用 SPSS 16.0 软件对数据进行分析，试验数据用平均值±标准差表示，采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 LSD 法分析组间差异显著性，不同的参数之间的相关性进行了皮尔森相关系数(R)分析[16]。

2 结果与分析

2.1 白腐菌对玉米秸秆的生物质损失率的影响

由表 1 可知，4 种白腐菌均能有效降解秸秆的生物质成分。红侧耳组总有机物（total organic matter,TOM）损失率显著高于金顶侧耳组和刺芹侧耳组（P<0.05）。漏斗状侧耳组 ADL 损失率显著高于其他各组（P<0.05），说明漏斗状侧耳对 ADL 的降解能力强于其他 3 种白腐菌。金顶侧耳组 CL 损失率显著高于刺芹侧耳组和漏斗状侧耳组（P<0.05），金顶侧耳组 HC 损失率显著高于其他各组（P<0.05），可见金顶侧耳具有较强的 CL 和 HC 的分解能力。漏斗状侧耳对 HC 的降解能力仅次于金顶侧耳。

表 1 白腐菌对玉米秸秆的生物质损失率的影响

Table 1 Effects of white rot fungi on biomass constituent loss rates of corn stover %

项目 Items	总有机物损失率 TOM loss rate	酸性木质素损失率 ADL loss rate	纤维素损失率 CL loss rate	半纤维素损失率 HC loss rate
金顶侧耳组 *P. citrinopileatus*	6.82±0.36[b]	16.01±0.82[c]	9.26±1.42[a]	16.14±1.63[a]

group				
刺芹侧耳组 *P. eryngii* group	6.73±0.30[b]	17.47±0.84[bc]	2.23±0.12[c]	8.99±1.93[c]
漏斗状侧耳组 *P. sajor caju* group	7.17±0.31[ab]	28.59±1.93[a]	5.04±0.57[b]	11.92±0.41[b]
红侧耳组 *P. diamor* group	7.61±0.24[a]	19.20±1.81[b]	8.20±0.55[a]	8.66±0.61[c]

同列数据肩标不同小写字母表示差异显著（*P*<0.05），相同或无字母表示差异不显著（*P*>0.05）。表 2、表 3 同。

In the same column, values with different small letter superscripts mean significant difference (*P*<0.05), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference (*P*>0.05). The same as Table 2 and Table 3.

2.2 白腐菌对玉米秸秆营养成分含量及 IVDMD 的影响

由表 2 可知，4 种白腐菌组的 CP、EE、总氨基酸含量和 IVDMD 均高于对照组。金顶侧耳组的CP含量显著高于对照组（*P*<0.05），其他3组略高于对照组，但差异不显著（*P*>0.05），4 组之间 CP 含量差异不显著（*P*>0.05）。与对照组相比，金顶侧耳组、漏斗状侧耳组和红侧耳组 EE 含量显著提高（*P*<0.05），EE 含量增加了 29.49%~79.48%。与对照组相比，4 种白腐菌组的总氨基酸含量显著提高（*P*<0.05），刺芹侧耳组的总氨基酸含量显著低于其他 3 组（*P*<0.05）。4 种白腐菌组的 IVDMD 显著高于对照组（*P*<0.05），由高到低依次为：漏斗状侧耳组>刺芹侧耳组>金顶侧耳组>红侧耳组；漏斗状侧耳组的 IVDMD 其他各组相比，增加了 6.57%~90.08%。

表 2　白腐菌对玉米秸秆营养成分含量及体外干物质消化率的影响

Table 2　Effects of white rot fungi on nutrient component contents and *in vitro* dry matter

digestibility of corn stover

项目 Items	粗蛋白质 CP/%	粗脂肪 EE/%	总氨基酸 Total amino acids/(mg/g)	体外干物质消化率 IVDMD/%
对照组 Control group	5.42±1.16[b]	0.78±0.15[c]	159.59±7.65[c]	20.05±1.52[e]
金顶侧耳组 *P. citrinopileatus* group	8.05±0.62[a]	1.20±0.12[ab]	229.71±7.10[a]	41.50±1.32[bc]
刺芹侧耳组 *P. eryngii* group	6.50±0.62[ab]	1.01±0.33[bc]	197.87±7.47[b]	43.68±1.15[b]
漏斗状侧耳组 *P. sajor caju* group	7.11±1.13[ab]	1.15±0.15[ab]	220.48±5.37[a]	46.56±0.32[a]
红侧耳组 *P. diamor* group	6.96±0.63[ab]	1.40±0.11[a]	216.20±3.21[a]	40.91±0.35[c]

2.3 白腐菌对玉米秸秆抗氧化性能的影响

如表 3 所示，与对照组相比，4 种白腐菌组的玉米秸秆均可增加其抗氧化性能，DPPH 自由基清除力、还原力、总抗氧化能力和总酚含量均显著高于对照组（$P<0.05$）。漏斗状侧耳组 DPPH 自由基清除力略高红侧耳组（$P>0.05$），此 2 组显著高于其他 3 组（$P<0.05$）。4 种白腐菌组的还原力显著高于对照组（$P<0.05$），但 4 种白腐菌组之间差异不显著（$P>0.05$）。漏斗状侧耳组的总抗氧化能力最强，其次是红侧耳组，显著高于其他 3 组（$P<0.05$）。漏斗状侧耳组亚铁离子螯合能力和总酚含量显著高于其他各组（$P<0.05$），其次是红侧耳组。以上结果表明，4 种白腐菌处理秸秆后其抗氧化性性能由大到小依次为：漏斗状侧耳组>红侧

耳组>刺芹侧耳组>金顶侧耳组。

表 3　白腐菌对玉米秸秆抗氧化性能的影响

Table 3　Effects of white rot fungi on antioxidant properties of corn stove

项目 Items	DPPH 自由基清除力 DPPH free radical cleaning capacity/%	还原力 Reducing power/%	总抗氧化能力 Total antioxidant capacity/%	亚铁离子螯合能力 Fe^{2+} metal chelating capacity/%	总酚含量 Total phenolic content/(mg/g)
对照组 Control group	30.35±0.73[d]	0.51±0.12[b]	27.38±1.22[d]	10.56±1.25[d]	2.87±0.11[d]
金顶侧耳组 *P. citrinopileatus* group	32.96±1.50[c]	0.90±0.15[a]	38.78±1.65[b]	11.94±0.80[cd]	4.74±0.18[c]
刺芹侧耳组 *P.eryngii* group	36.91±1.49[b]	0.74±0.11[a]	34.64±2.04[c]	12.71±0.78[c]	5.67±0.98[b]
漏斗状侧耳组 *P.sajor caju* group	54.90±1.47[a]	0.97±0.15[a]	43.35±1.46[a]	15.87±0.67[a]	7.27±0.32[a]
红侧耳组 *P.diamor* group	53.60±0.56[a]	0.85±0.13[a]	40.79±0.46[ab]	14.27±0.08[b]	6.26±0.39[b]

如表 4 所示，大部分参数之间存在相关性，ADL 损失率与 IVDMD 和总酚含量显著正相关（P<0.01），总酚含量与 DPPH 自由基清除力、还原力、总抗氧化能力和亚铁离子螯合

能力均呈显著的正相关性（*P*<0.05 或 *P*<0.001）。

表 4　不同参数之间皮尔森相关系数

Table 4　Pearson’s correlation coefficient (r) among different parameters

项目 Items	总有机物损失率 TOM loss rate/%	酸性木质素损失率 ADL loss rate/%	体外干物质消化率 IVDMD/%	DPPH 自由基清除力 DPPH free radical cleaning capacity/%	还原力 Reducing power/%	总抗氧化能力 Total antioxidant capacity/%	亚铁离子螯合能力 Fe^{2+} metal chelating capacity/%	总酚含量 Total phenolic content/(mg/g)
总有机物损失 TOM loss rate/%	1.000							
酸性木质素损失 ADL loss rate /%	0.329	1.000						
体外消化率 IVDMD/%	0.049	0.797**	1.000					
DPPH 自由基清除力 DPPH free radical cleaning capacity/%	0.419	0.895***	0.762**	1.000				
还原力 Reducing power/%	0.147	0.217	0.419	0.406	1.000			

总抗氧化性 Total antioxidant capacity/%	0.524	0.902***	0.748**	0.923***	0.517	1.000		
亚铁离子螯合能力 Fe^{2+} metal chelating capacity/%	0.427	0.937***	0.663*	0.916***	0.531	0.937***	1.000	
总酚含量 Total phenolic content/(mg/g)	0.391	0.874**	0.706*	0.839***	0.594*	0.853***	0.923***	1.000

*表示 P<0.05，**表示 P<0.01，***表示 P<0.001。

* mean P<0.05，** mean P<0.01，*** mean P<0.001.

3 讨 论

3.1 白腐菌对玉米秸秆生物质损失率的影响

生物降解秸秆有效解决了木质CL难降解、不易被草食动物消化利用等难题。多年研究发现，自然界中，白腐菌是分解木质素最有效的真菌，经过长期的生物进化，白腐菌能够分泌多种氧化降解木质素的酶类，形成了一套独特的分解木质素降解酶系统[17]。本研究发现，4种白腐菌发酵玉米秸秆明显改变了其生物质含量，ADL降解最多，其次是HC和CL。这是因为白腐菌发酵玉米秸秆对植物细胞壁中的CL、HC及ADL的降解具有选择性，对ADL的降解具有优先选择性。饲粮中CL含量影响反刍动物对饲料的消化利用效率，木质素含量与消化率之间存在着负相关性，是决定消化率的重要因素。秸秆中木质素含量下降，意味着消化率和适口性增加，反之亦然。虽然许多研究证明了白腐菌对木质CL有降解作用，但同时也证明了不同种属的白腐菌降解木质素和分解有机物的能力存在明显差异

[7]。在本研究中，漏斗状侧耳对 ADL 的降解能力较强，这与 Jafari 等[18]研究结果相近。而金顶侧耳则具有较强降解 CL 和 HC 能力。

3.2 白腐菌对玉米秸秆营养成分含量及 IVDMD 的影响

多年来，我国畜牧业一直面临蛋白质饲料资源短缺问题，大量的粮食作物投入到动物饲料生产中，加剧人畜争粮矛盾激烈化，解决此问题刻不容缓。白腐真菌可将多种氮源转化为菌体蛋白，提高玉米秸秆等发酵物中的蛋白质含量[19]。目前，通常采用凯氏法测定 CP 含量，此法不能完全回收硝酸盐和亚硝酸盐等含氮化合物，而白腐菌可以将非蛋白氮转化成菌体蛋白（蛋白氮），导致凯氏定氮法测得的 CP 含量结果增加，这可能是白腐菌处理玉米秸秆增加 CP 含量原因之一。此外，白腐菌发酵的过程中可将木质 CL 氧化降解成二氧化碳（CO_2），致使干物质含量降低，单位总蛋白质含量增加。本研究表明，4 种侧耳属白腐菌利用发酵底物中的氮源合成蛋白质及丰富的氨基酸，并提高了玉米秸秆的消化效率，这与 Arora 等[7]研究结果相似。玉米秸秆消化率的提高，一方面可能是由于白腐菌处理玉米秸秆后，木质 CL 含量降低，另一方面可能是因为白腐菌处理玉米秸秆使其中蛋白质含量增加。研究表明，饲粮中蛋白质和脂肪水平可以调控反刍家畜对粗纤维的消化率，瘤胃内氨态氮（NH_3-N）浓度升高后，为瘤胃微生物提供生长繁殖所必须的氮源，导致细菌和原虫数量增加，小肽数量增多，促进瘤胃中 CL 分解菌生物活性，提高消化率。

3.3 白腐菌对玉米秸秆抗氧化性能的影响

白腐菌在固态发酵条件下，可以利用不同类型低质量的农业废弃物，将其转化为高营养动物饲料补充料[20]。而抗氧化性能能够很好地反映出饲料化秸秆的品质，其中 DPPH 自由基清除力、还原力、总抗氧化能力、亚铁离子螯合能力和总酚含量是评价抗氧化性能的几个关键参数。在本试验中发现，4 种白腐菌处理的玉米秸秆中 DPPH 自由基清除能力、还原力、总抗氧化能力、亚铁离子螯合能力和总酚含量均显著高于对照组，这说明白腐菌处理玉米秸秆的过程中，产生了具有抗氧化作用的物质，阻断自由基链式反应，与亚铁离子结合形成稳

定的螯合物，消除物质氧化对机体造成的损伤，延缓蛋白质和糖类的氧化。此外，总酚含量与 DPPH 自由基清除力、还原力、总抗氧化能力、亚铁离子螯合能力呈正相关，ADL 的损失率与总酚含量呈正相关，这可能是由于木质素的降解释放了酚类化合物，从而增加抗氧化活性，这与 Chandra 等[21]和 Assi 等[22]研究的结果相似。已有研究表明，抗氧化剂通过保持细胞功能和结构的完整性，提高细胞或非细胞的免疫功能。如果抗氧化能力受到限制，将缩短免疫细胞的寿命，增加了疾病的发生率[23]。在动物饲料中补充抗氧化剂能够增强动物的免疫功能并促进动物的生长，提高生长性能[24]。因此，白腐菌发酵处理的秸秆作为抗氧化剂添加到动物饲料中具有重要的调节作用。

4 结 论

① 4 种白腐菌都能够有效地降解玉米秸秆中生物质（CL、HC 和 ADL），其中金顶侧耳降解 CL 和 HC 效果最强，漏斗状侧耳降解 ADL 效果最强。

② 4 种白腐菌发酵玉米秸秆后均可提高其营养价值含量和 IVDMD，其中金顶侧耳组总氨酸含量最高，漏斗状侧耳组 IVDMD 显著高于其他各组。

③ 4 种白腐菌发酵玉米秸秆增加了玉米秸秆的抗氧化能力。

参考文献：

[1] EASTRIDGE M L,STARKEY R A,GOTT P N,et al.Dairy cows fed equivalent concentrations of forage neutral detergent fiber from corn silage,alfalfa hay,wheat straw,and corn stover had similar milk yield and total tract digestibility[J].Animal Feed Science and Technology,2017,225:81–86.

[2] ARPRA D S,SHARMA R K.Comparative ligninolytic potential of *Phlebia* species and their role in improvement of *in vitro* digestibility of wheat straw[J].Journal of Animal and Feed Sciences,2009,18(1):151–161.

[3] 张婷婷,吴京科,祁娜,等.白腐菌在有机固体废弃物堆肥中的研究进展[J].吉林农业科

学,2011,36(4):37–40.

[4] 胡立红,周永红,刘瑞杰,等.木质素氧化降解制备酚类化合物研究进展(英文)[J].生物质化学工程,2012,46(1):23–33.

[5] DUVAL A,LAWOKO M.A review on lignin-based polymeric,micro-and nano-structured materials[J].Reactive and Functional Polymers,2014,85:78–96.

[6] SHARMA R K,ARORA D S.Fungal degradation of lignocellulosic residues:an aspect of improved nutritive quality[J].Critical Reviews in Microbiology,2015,41(1):52–60.

[7] ARORA D S,SHARMA R K,CHANDRA P.Biodelignification of wheat straw and its effect on *in vitro* digestibility and antioxidant properties[J].International Biodeterioration and Biodegradation,2011,65(2):352–358.

[8] 杨胜.饲料分析及饲料质量检测技术[M].北京:中国农业大学出版社,1999.

[9] MENKE K H,RAAB L,SALEWSKI A,et al.The estimation of the digestibility and metabolizable energy content of ruminant feeding stuffs from the gas production when they are incubated with rumen liquor *in vitro*[J].The Journal of Agricultural Science,1979,93(1):217－222.

[10] LAHO T,VÁRADYOVÁ Z,MIHALIKOVÁ K,et al.Fermentation capacity of fecal microbial inocula of Przewalski horse,Kulan,and Chapman Zebra and polysaccharide hydrolytic activities of fecal microbial constituents (*Ciliates* and *Bacteria*) of Kulan and Chapman Zebra[J].Journal of Equine Veterinary Science,2013,33(3):143–149.

[11] 孙娟娟,玉柱,薛艳林,等.添加剂对羊草青贮发酵品质和体外消化率的影响[J].草地学报,2007,15(3):238–242.

[12] ARORA D S,CHANDRA P.Assay of antioxidant potential of two *Aspergillus* isolates by different methods under various physio-chemical conditions[J].Brazilian Journal of

Microbiology,2010,41(3)765–777.

[13] CHANG L W,YEN W J,HUANG S C,et al.Antioxidant activity of sesame coat[J].Food Chemistry[J].2002,78(3):347–354.

[14] OTHMAN A,ISMAIL A,GHANI N A,et al.Antioxidant capacity and phenolic content of cocoa beans[J].Food Chemistry,2007,100(4):1523–1530.

[15] ZHAO G R,XIANG Z J,YE T X,et al.Antioxidant activities of *Salvia miltiorrhiza* and Panax notoginseng[J].Food Chemistry,2006,99(4):767–774.

[16] SHARMA R K,ARORA D S.Changes in biochemical constituents of paddy straw during degradation by white rot fungi and its impact on *in vitro* digestibility[J].Journal of Applied Microbiology,2010,109(2):679–686.

[17] SHARMA R K,ARORA D S.Production of lignocellulolytic enzymes and enhancement of *in vitro* digestibility during solid state fermentation of wheat straw by *Phlebia floridensis*[J].Bioresource Technology,2010,101(23):9248–9253.

[18] MIRZAEI J,TABARI M,DAROODI H,et al.The effect of *Pleurotus* spp. fungi on chemical composition and *in vitro* digestibility of rice straw[J].Pakistan Journal of Biological Sciences,2007,10(15):2460–2464.

[19] ARORA D S,SHARMAR K.Effect of different supplements on bioprocessing of wheat straw by *Phlebia brevispora*:changes in its chemical composition,*in vitro* digestibility and nutritional properties[J].Bioresource technology,2011,102(17):8085–8091.

[20] LATEEF A,OLOKE J K,KANA E B G,et al.Improving the quality of agro-wastes by solid-state fermentation:enhanced antioxidant activities and nutritional qualities[J].World Journal of Microbiology and Biotechnology,2008,24(10):2369–2374.

[21] CHANDRA P,ARORA D S.Antioxidant activity of fungi isolated from soil of different areas

of Punjab,India[J].Journal of Applied and Natural Science,2009,1(2):123–128.

[22] ASSI J A,KING A J.Assessment of selected antioxidants in tomato pomace subsequent to treatment with the edible oyster mushroom,*Pleurotus ostreatus*,under solid-state fermentation[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry,2007,55(22):9095–9098.

[23] WEISS W P.Antioxidant nutrients,cow health,and milk quality[C]//Dairy Cattle Nutrition Workshop.Penn State:Department of Dairy and Animal Sciences,2005:11–18.

[24] 王妍琪,孙文志.抗氧化饲料添加剂在畜牧业中的应用[J].饲料博览,2003(10):36–39.

Effects of White Rot Fungi on Nutritional Value and Antioxidant Property of Corn Stover

WANG Yuqiong[1,2]　ZHOU Daowei[1*]

(1. *Northeast Institute of Geography and Agriecology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Changchun* 130102, *China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: This experiment was conducted to investigate the effects of white rot fungi on nutritional value and antioxidant property of corn stover. Four *Pleurotus* white rot fungi were selected: *Pleurotus diamor*, *Pleurotus citrinopileatus*, *Pleurotus eryngii* and *Pleurotus sajor caju*. The corn stover in control group was not inoculated any strain, and corn stover in experimental groups was inoculated 4 kinds of *Pleurotus* white rot fungi, each group contained 3 replicates, solid-state fermented for 20 days. Some parameters including nutrient component content, *in vitro* dry matter digestibility（IVDMD）of corn stover and antioxidant property were studied. The results showed as follows: 1) the total organic matter （TOM） loss rate of *Pleurotus diamor* group was significantly higher than that of *Pleurotus citrinopileatus* and *Pleurotus eryngii* groups（P<0.05）,

* Corresponding author, professor, E-mail: zhoudaowei@iga.ac.cn

the acid detergent fiber （ADL） loss rate of *Pleurotus sajor caju* group was significantly higher than that of other groups （*P*<0.05）, the cellulose （CL） loss rate of *Pleurotus citrinopileatus* group was significantly higher than that of *Pleurotus eryngii* and *Pleurotus sajor caju* groups （*P*<0.05）, the hemicelluloses (HC) loss rate of *Pleurotus citrinopileatus* group was significantly higher than that of other groups （*P*<0.05）. 2) The crude protein （CP） content of *Pleurotus citrinopileatus* group was significantly higher than that of control group （*P*<0.05）, the ether extract （EE） content of *Pleurotus citrinopileatus, Pleurotus sajor caju* and *Pleurotus diamor* groups was significantly higher than that of control group （*P*<0.05）, the total amino acid content of 4 kinds of white rot fungi groups was significantly higher than that of control group （*P*<0.05）, the IVDMD of 4 kinds of white rot fungi groups was significantly higher than that of control group （*P*<0.05）. 3) The 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) free radical cleaning capacity, reducing power, total antioxidant capacity and total phenolic content of 4 kinds of white rot fungi groups was significantly higher than that of control group （*P*<0.05）. In conclusion, white rot fungi pretreatment with corn stover can improve the IVDMD, CP content and antioxidant property of corn stover, and it can be used as a novel feed resource for ruminant animals.

Key words: white rot fung; corn stover; antioxidant property

---

*Corresponding author, professor, E-mail: zhoudaowei@iga.ac.cn （责任编辑 武海龙）